第 40 卷 第 6 期
2023 年 12 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 6
Dec. 2023

文章编号:1000-4939(2023)06-1354-10

设计参数对双钢板混凝土偏压构件受力性能的影响

宋玉香,许伯宁,刘勇,张艳青

(石家庄铁道大学土木工程学院,050043 石家庄)

摘 要:为探究管幕预筑结构受力机理,对双钢板混凝土偏压构件受力性能进行研究。完成了 4 根双钢板-混凝土组合构件的偏压试验,建立有限元模型,通过计算结果与试验结果的对比,验证了模型的正确性和可靠性。以端部约束形式、界面连接形式、偏心距为参数进行数值分析,结果表明:钢板混凝土偏压构件中,当端部约束足够强(看作刚臂)时,混凝土与两侧钢板共同参与受力,截面应变基本符合平截面假定,不存在界面滑移,在不考虑屈曲的前提下,连接件的设置对构件承载力没有影响,承载力最高;当端部约束不够强,外荷载不能同时作用在混凝土和两侧钢板上时,在钢板与混凝土间设置连接件可提高构件的承载力,钢板与混凝土界面设置为合并重合结点时,构件承载能力最高。

关键词:管幕预筑结构;双钢板-混凝土组合结构;端部约束;界面连接;偏心距

中图分类号:TU375.4 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.06.016

Effects of design parameters on mechanical properties of eccentrically loaded double-steel-plate-concrete members

SONG Yuxiang, XU Boning, LIU Yong, ZHANG Yanqing

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, 050043 Shijiazhuang, China)

Abstract: To investigate the stress mechanism of pipe-roof pre-construction structure, the force performance of the double-steel-plate-concrete biased members was explored. The test of four double-steel-plate-concrete composite members was completed, and the finite element model was established. The correctness and reliability of the model were verified by comparing the calculation results with the test results. The numerical analysis took the form of end restraint, the form of interface connection, and eccentricity as parameters. The results show that in the steel-steel-concrete eccentric compression member, when the end restraint is strong enough, concrete and steel plates on both sides participate in the force work together, and there is no interface slip. Without considering the buckling, the setting of the connector does not affect the bearing capacity of the member, and the bearing capacity is the highest at this time. When the end restraint is not strong enough and the external load cannot act on the concrete and the steel plates on both sides at the same time, setting a connector between the steel plate and concrete can improve

收稿日期:2022-01-18 **修回日期**:2022-07-08

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2018YFC0808704);国家自然科学基金-青年科学基金资助项目(No. 52008271);石家庄铁道大学研究生创新资助项目(No. YC2021030);大学生科技创新能力培育专项资助项目(No. 2021H011708)

通信作者:刘勇,教授。E-mail:liuyong36262@163.com

引用格式:宋玉香,许伯宁,刘勇,等. 设计参数对双钢板混凝土偏压构件受力性能的影响[J]. 应用力学学报,2023,40(6):1354-1363.
SONG Yuxiang, XU Boning, LIU Yong, et al. Effects of design parameters on mechanical properties of eccentrically loaded double-steel-plate-concrete members[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(6):1354-1363.

the bearing capacity of the member. When the coincident nodes on the interface between steel plate and concrete are combined into the same node, the bearing capacity is the highest.

Key words: pipe-roof pre-construction structure; double-steel-plate-concrete member; end restraint; interface connection; eccentricity

管幕预筑结构是一种新型地下钢-混凝土组合结构,由管幕预筑工法建造而成[1-2]。施工时,首先沿设计轮廓顶进大直径钢管,经切割钢管、开挖管间土体、焊接管间连接钢板,形成一个由内外两层钢管幕组成的环向及纵向完全联通的空腔。在该空腔内部绑扎钢筋、浇筑混凝土,形成永久结构后,再进行内部土体的开挖,形成地下空间。所形成的永久结构即为管幕预筑结构,如图 1 所示。从组成上看,此类结构主要包括内外两层钢管幕及中间混凝土,与地上工程中的钢板混凝土组合结构类似;从受力上看,管幕预筑马蹄形结构的各组成部分(图 1a)及管幕预筑类矩形结构(图 1b)的侧墙均以承受偏压荷载为主,故本研究对双钢板混凝土偏压构件的力学性能进行研究,为管幕预筑结构设计提供参考。

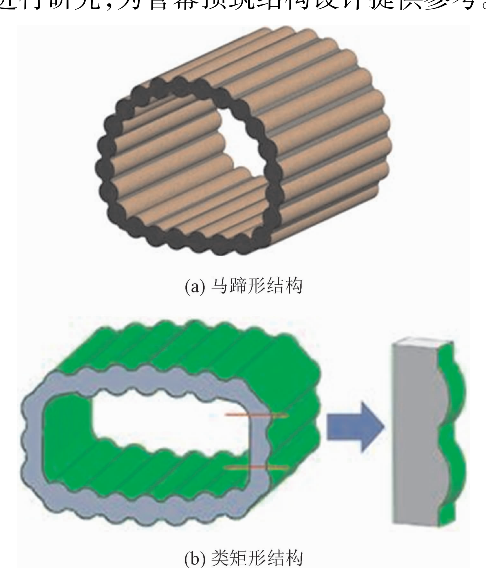


图 1　管幕结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of tubular roof prefabricated structure

双钢板-混凝土结构是一种采用钢板代替受力钢筋外包于混凝土而形成的组合结构,构件中间为混凝土,内外两侧均为钢板,钢板与混凝土之间设置连接件。此类结构主要利用外侧钢板承受拉力,核心混凝土承受压力。两侧钢板对核心混凝土提供一定的约束作用。同时能提高构件的抗渗及抗裂性能。核心混凝土为受压侧钢板提供支撑,防止失稳。

在地下腐蚀性环境中,钢筋混凝土结构受拉侧混凝土易开裂、浸蚀,从而导致内部钢筋锈蚀,结构耐久性降低。而双钢板混凝土结构,由于外包钢板的约束作用,受拉侧混凝土不易开裂,减少了内部钢筋锈蚀。同时外侧钢管及钢板采用满足《工业建筑防腐蚀设计标准》GB/T 50046—2018 相关规定[3]的外涂耐侵蚀防水涂层后,可有效降低地下水对钢板的锈蚀作用,提高结构的耐久性。

如今,双钢板-混凝土结构已被应用于海洋结构[4]、核电站安全壳[5]、桥梁结构、储水池、超高层建筑剪力墙结构[6-7]、储气罐、地下结构以及军事工程结构等[8]。随着应用范围的扩大,国内外研究人员对双钢板-混凝土结构构件在不同荷载工况下受力性能的研究逐渐深入[9]。LIEW[10]、杨悦[5]、卢显滨[11]、严加宝等[12]先后针对双钢板混凝土构件受弯性能展开研究,分析了核心混凝土种类、剪跨比、钢板厚度及连接件间距等参数对构件受弯性能和破坏形态的影响,提出了多种双钢板-混凝土组合结构受弯承载力理论分析模型以及相应的受弯承载力计算公式。冷予冰[13]、覃锋等[14]对双钢板混凝土构件的受剪性能展开研究,对不同剪跨比和抗剪配筋率构件的受剪破坏过程和破坏模式等问题进行分析,提出了最小抗剪配筋率建议值。EMORI[15]、王金金[16]、韦芳芳[17]、刘阳冰[18]、夏培秀等[19]对双钢板混凝土构件轴心受压性能展开研究,总结了距厚比和连接件设置参数对钢板局部屈曲、构件破坏形态以及承载能力的影响规律。目前针对双钢板混凝土组合构件的研究主要集中在构件受弯性能、受剪性能、轴心受压性能以及内部构造参数问题,对于构件偏压受力性能以及端部设计形式少有研究。

与钢筋混凝土构件中钢筋锚固于混凝土内、与混凝土共同受力不同,双钢板混凝土构件中仅靠钢板与混凝土界面上的化学黏结作用或设置连接件将两种材料连接在一起,界面连接程度远小于钢筋混凝土构件中混凝土对钢筋的锚固,不同界面连接程度必然会影响荷载的传递路径。因此,为研究不同荷载传递路径对双钢板混凝土偏压构件受力性能的影响,本研究完成了 4 个等截面双钢板混凝土偏压试件实验,并建立了同等试验条件的有限元模型,取得相关计算参数后开展端部约束形式、界面连接形

式及偏心距对构件受力性能影响的研究。

1 端部约束分析

1.1 端部约束形式

本研究主要考虑 3 种端部约束形式。第一种端部约束形式属于构件端部没有侧向约束，根据《混凝土结构试验方法标准》[20]中给出的加载方式，此种加载方式的端部形式是将两块加载板直接放置在构件两端，再通过上下两组刀铰施加偏心荷载，如图 2(a)所示。这种加载方式对于受拉侧钢板只能传递压力，无法传递拉力。

第二种端部约束形式属于构件端部存在一定的侧向约束，其加载方式采用柱帽形式，是将构件两端套在柱帽内，柱帽与构件之间插入钢板，利用柱帽两侧预留的螺栓孔，将螺栓顶住插入的钢板，通过螺栓的松紧控制构件的约束强度，如图 2(b)所示。采用这种端部约束形式，通过柱帽仅可传递部分拉力至受拉侧钢板上。

第三种端部约束形式属于构件端部存在极大的侧向约束(视为刚臂)，其加载方式是将端部加载板与两侧钢板的端部进行焊接，再焊接足够的横向钢筋和横向钢筋，使构件端部的加载板与两侧钢板形成一个刚性臂，如图 2(c)所示。其作用相当于在构件端部施加了极大的侧向约束，外力可通过端部传递至构件中间工作区段。

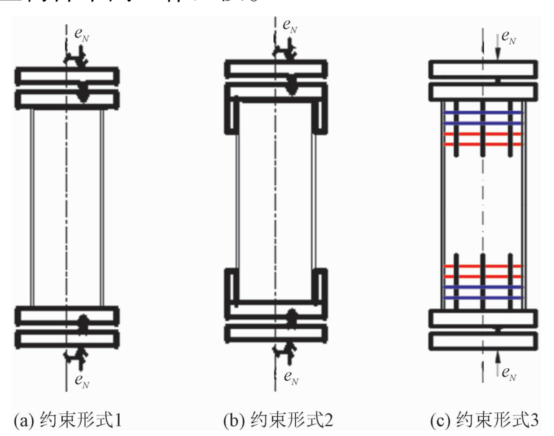


图 2 双钢板-混凝土构件端部约束形式

Fig. 2 End restraint form of double-steel-plate-concrete member

1.2 界限偏心距

当两侧钢板与中间混凝土部分同时受弯矩 $M=Ne$ 作用时，紧贴受拉侧界面的核心混凝土拉应变值等于紧贴受拉侧界面的受拉钢板拉应变值 $\varepsilon_{3M\mathrm{tj}}$，即

$$\varepsilon_{3M\mathrm{tj}} = \frac{Ne(0.5h)}{E_{\mathrm{c}}I_0} \tag{1}$$

式中：$E_{\mathrm{c}}I_0$ 为双钢板混凝土组合梁截面刚度，可通过弹性模量比将钢板面积等效为混凝土面积，按换算截面法计算；I_0 为换算截面的惯性矩。

当三部分同时受轴力 N 作用时，整个截面上的压应变相等，可按下式计算，即

$$\varepsilon_{3N\mathrm{tj}} = \frac{N}{EA} = \frac{N}{E_{\mathrm{st}}A_{\mathrm{st}} + E_{\mathrm{sc}}A_{\mathrm{sc}} + E_{\mathrm{c}}A_{\mathrm{c}}} \tag{2}$$

当 $\varepsilon_{3M\mathrm{tj}} \geqslant \varepsilon_{3N\mathrm{tj}}$ 时，受拉侧钢板出现拉应变，受拉侧钢板与混凝土之间脱离，定义受拉侧钢板脱离时对应的偏心距为界限偏心距 e_{lim}，可按照下式计算，即

$$e_{\mathrm{lim}} \geqslant \frac{E_{\mathrm{c}}I_0}{(0.5h)(E_{\mathrm{st}}A_{\mathrm{st}} + E_{\mathrm{sc}}A_{\mathrm{sc}} + E_{\mathrm{c}}A_{\mathrm{c}})} \tag{3}$$

此时，若要保持钢板与混凝土共同参与工作，需要设置连接件。

2 试验研究

2.1 试件设计

设计完成了两组管幕预筑结构构件偏压试验。第 1 组试件采用图 2(b)端部约束形式——柱帽，以端部约束程度作为变量，共 2 根试件，记为 CS1 和 CS2。试件 CS2 端部仅用钢板将柱帽与构件塞紧，试件 CS1 在 CS2 的基础上用螺栓连接柱帽与两侧钢板，端部约束强于试件 CS2。横截尺寸均为 300 mm × 300 mm，采用 Q345 钢板，厚度为 8 mm。试件总高度 L 为 1 500 mm，偏心距为 150 mm。两试件均仅在受压侧布置栓钉连接件，所采用栓钉连接件直径为 8 mm，长度为 80 mm(包括顶部柱帽范围)，间距为 160 mm，试件形状尺寸如图 3(a)和(b)所示。

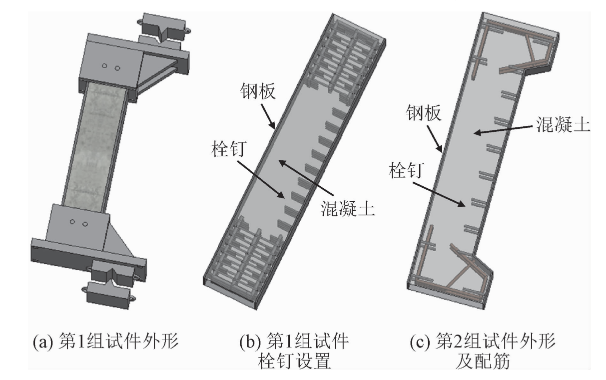


图 3 试件形式

Fig. 3 Test piece form

第 2 组试件端部采用图 2(a)所示约束形式。为保证端部不发生局部破坏，端部设计成图 3(c)所示牛腿的形式，变量为栓钉连接件的设置，WSD 试件为未设置连接件的试件，DSD 为在受压侧布置了连接件的试件。两试件横截面尺寸相同，均为 120 mm(b) ×160 mm(h)，采用钢板厚度均为 8 mm，试件总高度为 800 mm，偏心距为 40 mm，对应的偏心率为 0.25。所采用栓钉连接件直径为 8 mm，总长度为 55 mm(包括顶部螺栓帽)。

2.2　试验结果

试验结果显示，端部约束较强的 CS1 构件的最大承载能力较 CS2 构件提高约 26%，刚度提高 56%。端部较弱的 CS2 试件相对受拉侧裂缝数量少，且裂缝发展速度更快，试件荷载-挠度曲线如图 4(a)所示。

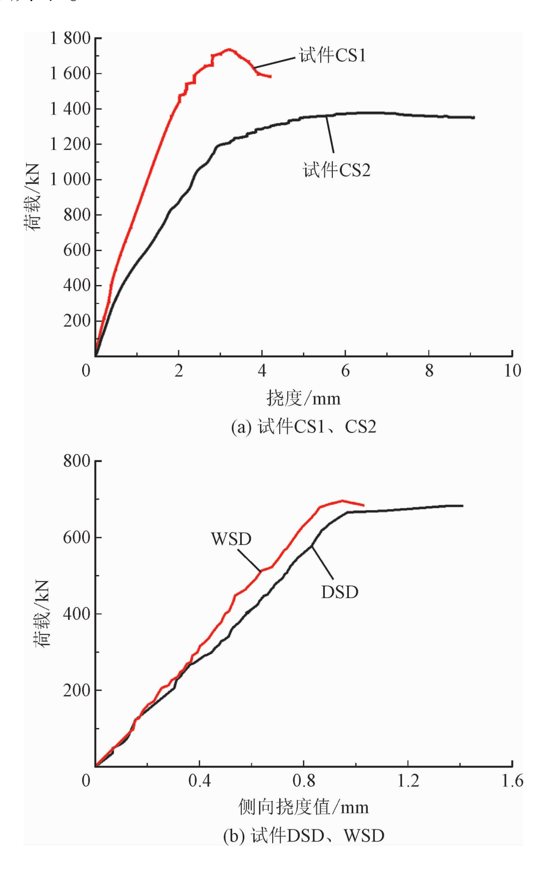


图 4　试件的荷载-挠度曲线

Fig. 4　Load deflection curve of test piece

WSD 与 DSD 两个试件的开裂荷载、受压侧钢板屈服的荷载以及峰值荷载较为接近，初始刚度基本一致，试件的荷载-挠度曲线如图 4(b)所示，试件 DSD“相对受拉区”的荷载-滑移曲线如图 5 所示。

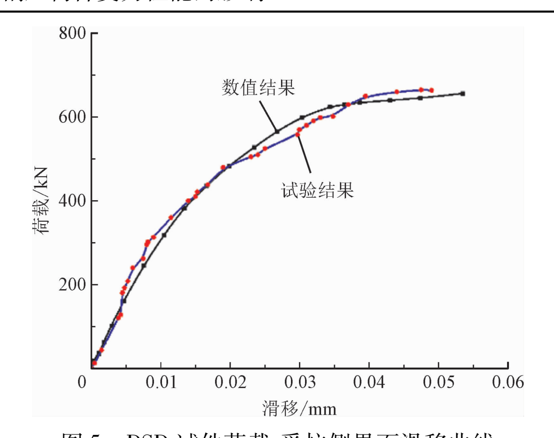


图 5　DSD 试件荷载-受拉侧界面滑移曲线

Fig. 5　Interface slip curves of DSD specimens under load and tension

3　有限元模型的建立与验证

3.1　模型的建立

采用 ANSYS 软件建立试件的有限元模型，如图 6(a)、(b)所示。试件中内部钢筋采用 Link8 杆单元，混凝土采用 Solid185 实体单元，两侧钢板采用 Shell181 单元，顶部加载板采用 Solid45 单元。两侧钢板与混凝土之间的非线性标准接触通过 Targe170、Conta173 单元模拟，使用 Combin39 单元模拟栓钉的抗滑移作用。图 6(c)所示为端部约束为刚臂时试件的有限元模型。当模拟加载板直接放置在构件端部时，端部界面设置为标准接触；当模拟刚臂时，设置为合并重合结点。

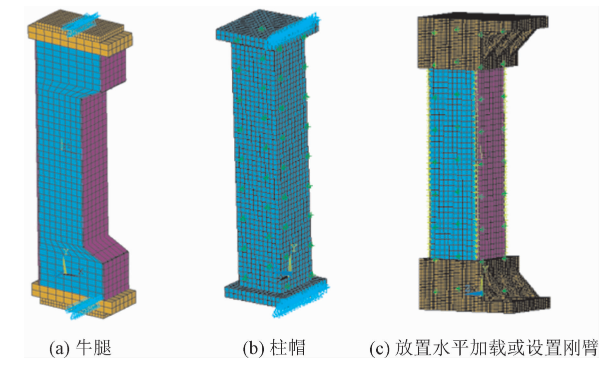


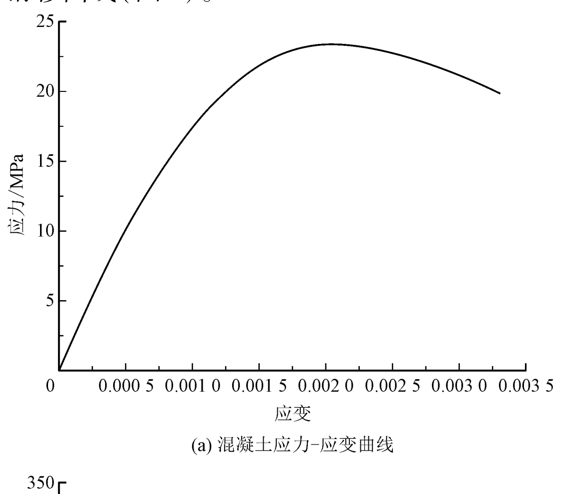
图 6　不同端部约束构件模型及边界条件示意图

Fig. 6　Schematic diagram of models and boundary conditions of different end restraint members

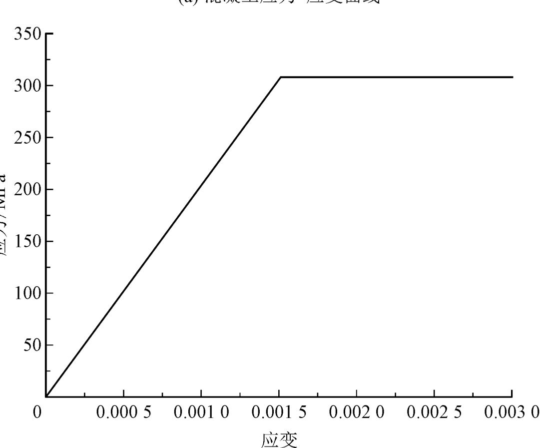
3.2　材料本构模型

采用软件提供的混凝土 DPC 弹塑性模型模拟构件中核心混凝土的性能。通过标准试块加载试验得混凝土立方体抗压强度为 35.3 MPa，弹性模量为

3.24×10^4 MPa,泊松比 $\nu=0.2$。钢板本构关系采用 BISO 双线性等向强化模型进行模拟,采用 Q345 钢板,其弹性模量为 $E_S=2.06\times10^5$ MPa,泊松比 $\nu_s=0.3$,屈服强度 $f_y=305$ MPa,主要材料的应力-应变曲线如图 7 所示。采用 Ollaggrd 模型得到栓钉剪力-滑移曲线(图 8)。



(a) 混凝土应力-应变曲线



(b) 钢板应力-应变曲线

图 7 材料应力-应变关系曲线

Fig. 7 Stress-strain curve of material

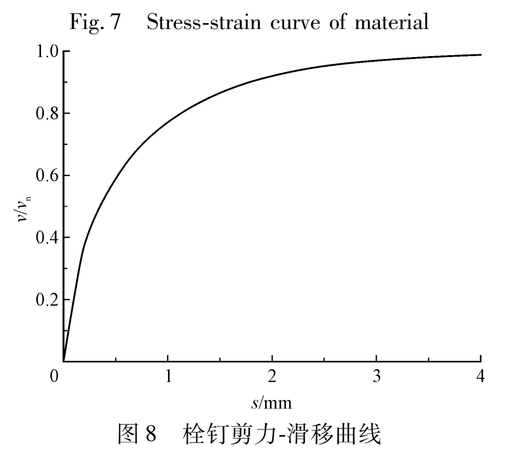


图 8 栓钉剪力-滑移曲线

Fig. 8 Shear slip curve of stud

3.3 模型的验证

有限元模型算得两组试件的荷载-挠度全过程曲线与试验结果的对比,如图 9 所示。可以看出,在整个加载过程中,数值模拟结果与试验结果吻合情况较好,试件的刚度误差约为 7%、最大承载力误差均在 3.1% 以内,因此所建立的有限元模型可以较好地模拟构件实际受力情况。

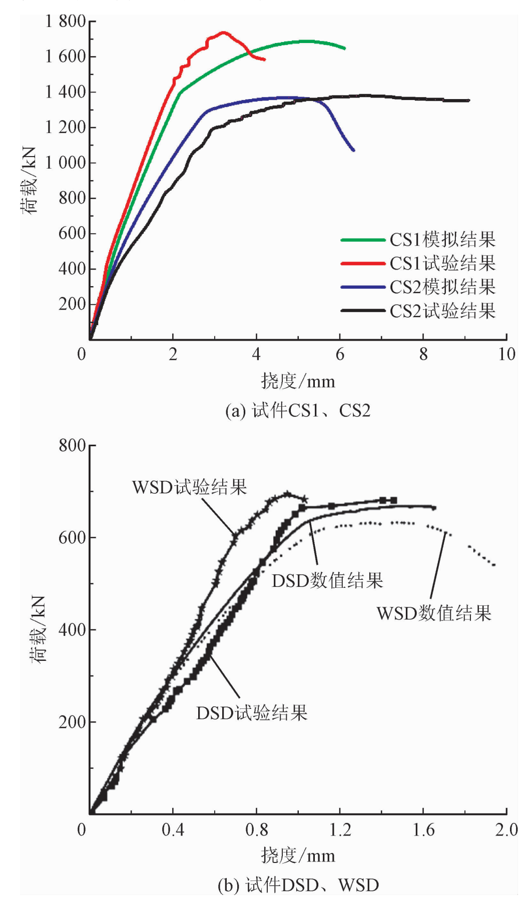


图 9 构件数值分析与室内试验研究结果对比图

Fig. 9 Comparison between numerical analysis of specimens and results of indoor experimental studies

4 参数影响分析

4.1 端部约束方式

构件端部约束的处理方式会直接影响荷载在相对受拉侧钢板、相对受压侧钢板及核心混凝土上的分配,进而影响构件的受力性能。故以 3 种端部约束形式(放置水平加载板、带有水平加载板及护套的柱帽和加载端设置为刚臂)作为参数,利用 CS1、CS2 构件的有限元模型进行分析(图 10)。

通过式(3)计算得到,当偏心距小于 60 mm 时,构件处于全截面受压状态;大于 60 mm 时,相对受拉侧钢板上会出现拉应力。因此,选取偏心距 50 mm

(全截面受压)和 120 mm(相对受拉侧出现拉应力)的构件分别进行参数分析。

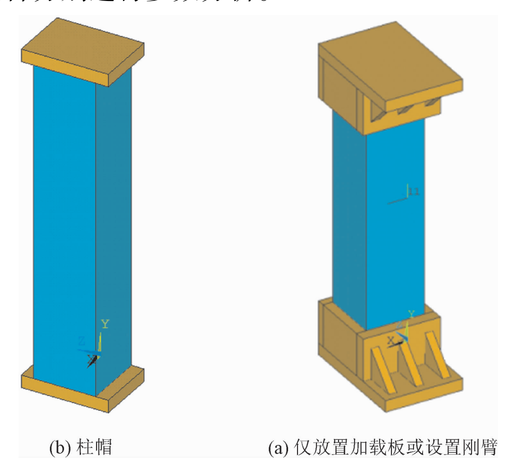


图 10　不同端部约束构件的几何模型

Fig. 10　Geometric model of different end restraint components

全截面受压构件端部采用加载板、柱帽及刚臂约束时,计算结果如图 11(a)所示。可以看出,在不考虑钢板屈曲及失稳的情况下,3 种端部约束形式的荷载-位移曲线最大值几乎一致,说明在全截面受压构件中,端部约束形式对构件极限承载能力影响不大。这主要是因为当截面处于全截面受压状态时,3 种端部约束方式均可以将压力传递至整个构件上,且构件的承载力主要是由受压侧钢板强度以及混凝土抗压强度控制,所以构件的承载力基本没有变化。

当相对受拉侧出现拉应力时,3 种端部处理方式的构件对应的荷载-位移曲线,如图 11(b)所示。对比可知,端部处理方式对构件的荷载-位移曲线影响较大,其中采用端部加载板时构件的承载能力和构件刚度最小,而设置刚臂的构件荷载-位移曲线最高,其承载力提高约 11.5%、刚度提高约 23%。采用柱帽的构件承载能力介于两者之间,承载力提高大约 6.01%,见表 1。

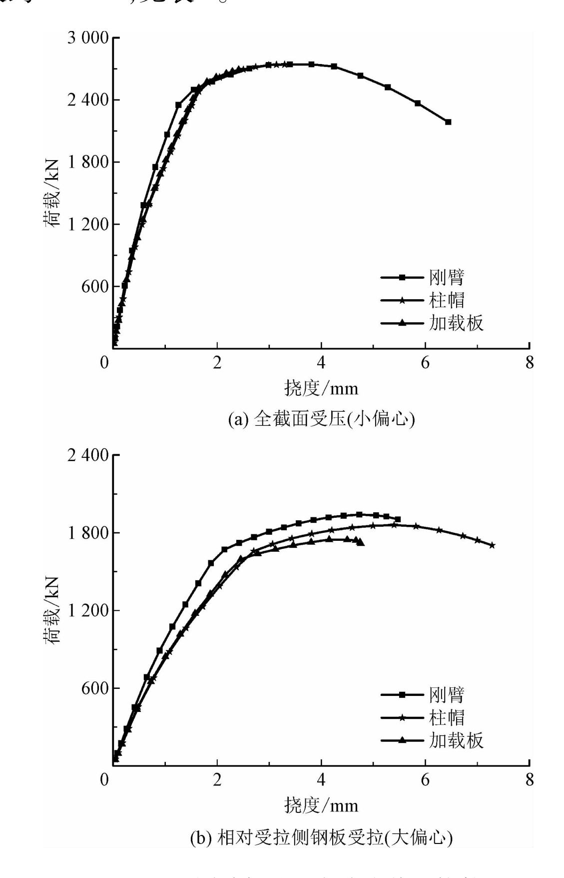


图 11　不同端部处理方式小偏压构件

Fig. 11　Small bias components with different end treatment methods

表 1　端部约束对大偏心构件承载力的影响

Tab. 1　Effect of end restraint on bearing capacity of large eccentric members

编号	偏心距/mm	端部约束形式	侧面边界形式	最大承载力/kN	承载力提高程度/%	刚度提高程度/%
1	120	加载板	栓钉连接件	1 747	–	–
2	120	柱帽	栓钉连接件	1 852	6.01	–
3	120	刚臂	栓钉连接件	1 948	11.5	23

究其原因为当端部形式设置为刚臂时,受拉侧钢板、受压侧钢板和混凝土共同参与工作,此时的钢板充当了配置在钢筋混凝土中的钢筋,钢板与混凝土的界面滑移趋于 0。当端部只有加载板时,由于加载板与构件端部截面之间仅能产生压力,不能产生拉力,故荷载仅仅施加在了混凝土及相对受压侧钢板上。而受拉侧钢板仅通过界面上的连接件和摩擦力带动参与受力,对结构承载力贡献很小,钢板与混凝土间的界面滑移较大。当采用柱帽形式时,四面的护套带动了受拉侧钢板受力,故受拉侧钢板对承载力有一定的贡献,但贡献值小于设置刚臂。同时,采用加载板构件延性较差,其主要原因是荷载施加位置混凝土被局部压碎,构件加载端附近破坏,而采用柱帽的构件在工作区段破坏,柱帽能很好地保护端部截面,避免构件发生局部破坏。

模型分析时,不考虑构件界面上钢板与混凝土的黏结作用,仅依靠所设置的连接面滑移,故取构件最终破坏阶段距离加载面较近的 3 排连接件上相对

变形值,确定构件的界面滑移值,所得结果如表 2 所列。可以看出,在 3 种端部约束形式构件中,随着到构件加载端距离的增加,界面滑移均在逐渐减小。端部为加载板、柱帽、刚臂 3 种形式时,同一截面上界面滑移逐渐减小。端部为刚臂的构件界面滑移最小,接近 0。

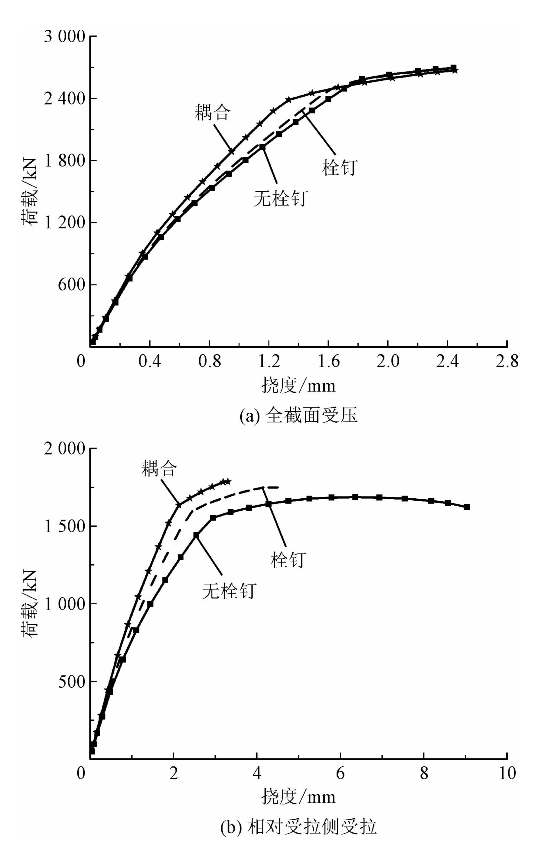
表 2 栓钉所在位置的界面滑移值

Tab. 2 Interface slip values of stud position

距构件端部距离/mm	端部刚臂构件滑移/mm	柱帽构件滑移/mm	加载板构件滑移/mm
190	0.031	0.100	0.160
350	0.025	0.097	0.120
510	0.010	0.050	0.055

4.2 界面连接形式

针对端部约束形式为加载板、柱帽、刚臂 3 种形式的构件,分别计算界面为完全组合(耦合)、标准接触(无栓钉)、设置间距为 160 mm 的栓钉连接件 3 种界面连接形式下构件的荷载-位移曲线,研究界面连接形式对构件受力性能的影响,所得结果如图 12 ~ 图 14 所示。

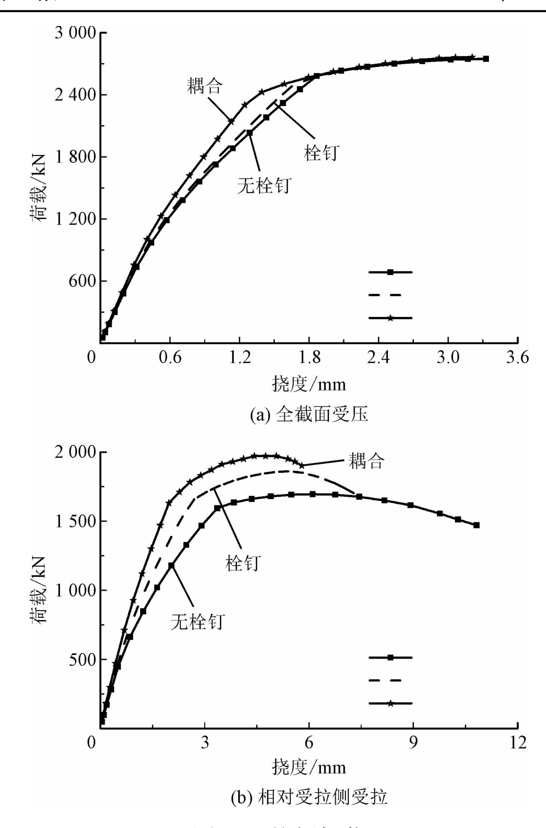


(a) 全截面受压

(b) 相对受拉侧受拉

图 12 加载板加载

Fig. 12 Loading plate

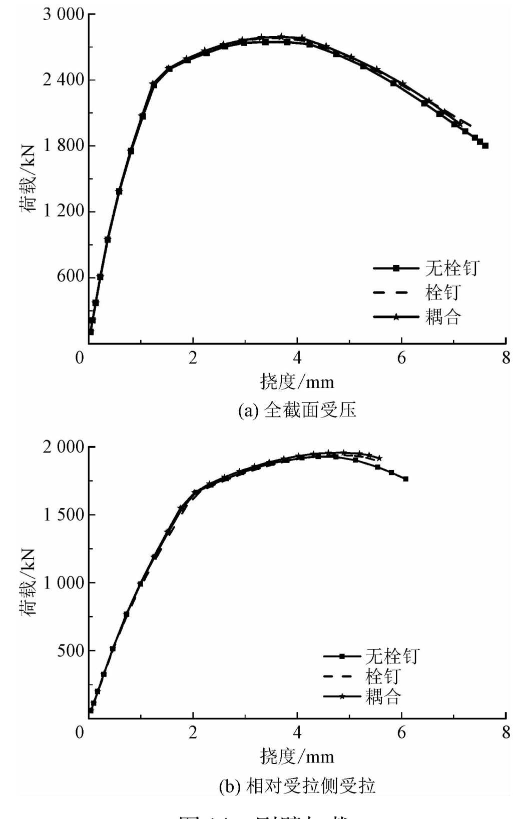


(a) 全截面受压

(b) 相对受拉侧受拉

图 13 柱帽加载

Fig. 13 Column cap loading



(a) 全截面受压

(b) 相对受拉侧受拉

图 14 刚臂加载

Fig. 14 Loading of rigid arm

对比图 12(a)、图 13(a)、图 14(a)可以看出,当

全截面受压时,3 种界面连接形式下构件的荷载-位移曲线相差不大,极限承载能力基本一致。当采用柱帽及加载板时,构件的前期侧向刚度略有不同,界面设置为合并重合结点时构件侧向刚度最大;采用标准接触时,构件侧向刚度最小;当设置连接件时,构件侧向刚度介于两者之间,说明在全截面受压构件中,端部为加载板和柱帽时,界面设置连接可以提高构件的刚度,而承载力影响不大。而采用刚臂时,3 种界面处理方式所得荷载-位移曲线几乎完全一致,也就是说当构件端部为刚臂、且不考虑受压侧钢板的屈曲时,即使不设置连接件,理论上构件也能达到最大承载能力。

对比图 12(b)、图 13(b)、图 14(b)可以看出,当相对受拉侧出现拉应力时,若采用加载板及柱帽,界面处理对构件的刚度及承载力均有很大的影响,当端部约束为加载板时,相比较钢板和混凝土界面设置为标准接触,增加间距 160 mm 的栓钉连接件可以使构件承载能力及刚度分别提升 2.88%、13.3%,而将侧面钢板与混凝土完全耦合连接,构件承载力及刚度可以分别提升 5.65%、32%。当端部约束为柱帽时,增加连接件可以使构件承载力和刚度分别提高 9.06%、18.1%,侧面钢板与混凝土合并重合结点,构件承载力与刚度分别提高 17.4%、42.9%,计算结果见表 3。其中,采用加载板的构件延性较差,这同样是因为端部加载板仅能受压,不能受拉,导致端部实际受压面积减小,混凝土局部压碎。若采用刚臂形式,混凝土与钢板共同参与工作,3 种不同界面处理方式所得结果完全一致。

表 3　界面连接对大偏心构件承载能力的影响

Tab. 3　Influence of interface connection on bearing capacity of large eccentric member

模型编号	偏心距/mm	端部约束形式	侧面边界形式	最大承载力/kN	承载力程度/%	刚度提高程度/%
1	120	加载板	标准接触	1 698	–	–
2	120	加载板	栓钉连接件	1 747	2.88	13.3
3	120	加载板	完全耦合	1 794	5.65	32
4	120	柱帽	标准接触	1 698	–	0
5	120	柱帽	栓钉连接件	1 852	9.06	18.1
6	120	柱帽	完全耦合	1 994	17.4	42.9

4.3　偏心距

以端部约束形式为柱帽的构件建立模型,界面处理方式分别为间距为标准接触(无栓钉)、160 mm 的连接件、完全组合耦合,偏心率分别为 0.17(50 mm)、0.2(60 mm)和 0.4(120 mm)时构件的荷载-变形全过程曲线如图 15 所示。结果显示,偏心距由 50 mm 增加至 60 mm,构件的承载力下降 3.2% ~3.9%,侧向位移增大 3% 左右,偏心距由 60 mm增加至 120 mm,构件的承载力下降 27.8% ~50.1%,侧向位移增大 71.4% ~214%。

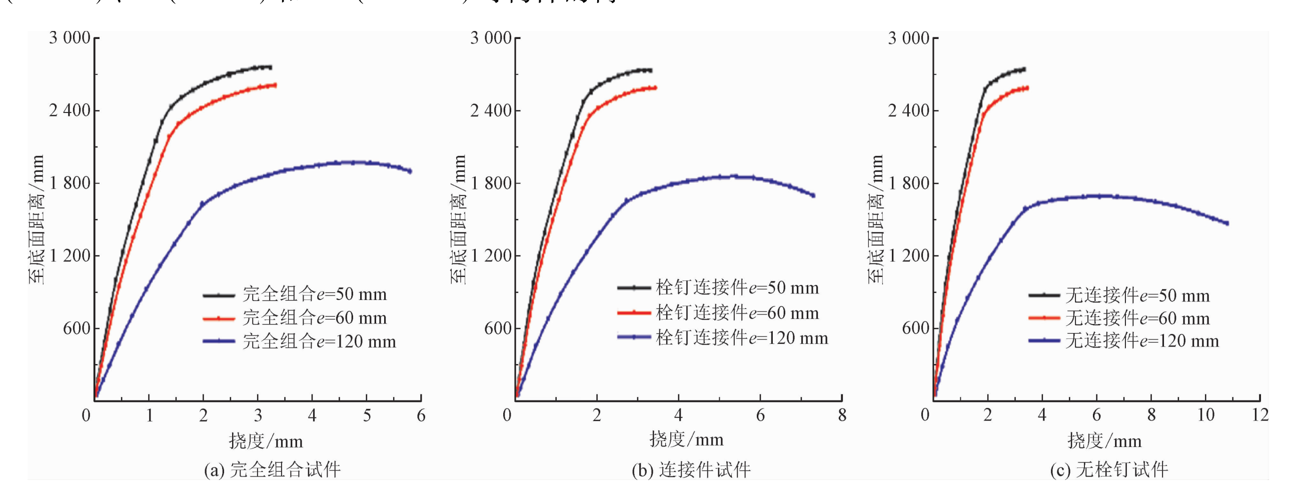


图 15　偏心距对构件荷载位移曲线的影响

Fig. 15　Influence of eccentricity on load displacement curve of component

5 结 论

本研究通过构件试验及数值模拟的方式,对双钢板混凝土偏压构件相对受拉侧钢板与混凝土受力机理进行了研究,得到的主要结论如下。

1)双钢板混凝土偏压构件中,当端部约束很强或者为刚臂时,混凝土与两侧钢板共同参与受力工作,基本不存在界面滑移。在不考虑屈曲的前提下,构件内部设置连接件对构件承载力基本没有影响。当端部约束无法使受拉侧钢板完全参与工作,外荷载不能同时作用在混凝土和两侧钢板上时,需要设置连接件保证构件承载能力及刚度。

2)对于全截面受压(小偏心)构件,试件端部约束程度大小对构件极限承载力无影响,提升端部约束程度刚度小幅提高,整体上对构件受力性能影响不大。对于相对受拉侧受拉(大偏心)构件,端部约束方式由加载板(无约束)变化到柱帽再至刚臂(完全约束),构件的极限承载能力分别提升 6.01%、11.5%,端部约束为刚臂时,构件刚度提高约 23%。

3)当端部约束很强或为刚臂时,界面为完全组合、标准接触、设置间距为 160 mm 的栓钉连接件 3 种形式下,构件的荷载-位移曲线相差不大,极限承载能力基本一致。当端部约束较弱,荷载仅直接作用混凝土和钢板中的一部分上时,界面连接的形式对构件的刚度及承载力均有很大的影响。

4)随着偏心距的增加,试件的极限承载力逐渐降低,刚度不断减小,侧向位移增大。当偏心距大于界限偏心距时,若端部采用加载板进行加载试验,构件会在端部发生局部破坏且延性较差。

参考文献:

[1] YAN J B,QIAN X D,LIEW J Y R,et al. Damage plasticity based numerical analysis on steel-concrete-steel sandwich shells used in the arctic offshore structure[J]. Engineering structures,2016,117:542-559.

[2] YAN J B,LIEW J Y R,ZHANG M H,et al. Punching shear resistance of steel-concrete-steel sandwich composite shell structure[J]. Engineering structures,2016,117:470-485.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 工业建筑防腐蚀设计标准:GB/T 50046—2018[S]. 北京:中国计划出版社,2019.

[4] LIEW J Y R,SOHEL K M A. Lightweight steel-concrete-steel sandwich system with J-hook connectors[J]. Engineering structures,2009,31(5):1166-1178.

[5] 杨悦,刘晶波,樊健生,等. 钢板-混凝土组合板受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(10):24-31.
YANG Yue,LIU Jingbo,FAN Jiansheng,et al. Experimental study on flexural capacity of steel plate-concrete composite slabs[J]. Journal of building structures,2013,34(10):24-31(in Chinese).

[6] 马恺泽,刘伯权,鄢红良,等. 高轴压比双层钢板-高强混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2014,31(5):218-224.
MA Kaize,LIU Boquan,YAN Hongliang,et al. Experimental investigation on aseismic behavior of dual steel high strength concrete shear walls with high axial load ratio[J]. Engineering mechanics,2014,31(5):218-224(in Chinese).

[7] 万馨,刘振杰,白尧尧,等. 钢板混凝土组合剪力墙-钢连梁外肋板节点抗震性能有限元分析[J]. 应用力学学报,2019,36(3):711-718.
WAN Xin,LIU Zhenjie,BAI Yaoyao,et al. Finite element analysis of the seismic performance of external rib plate joints between composite steel plate and concrete shear wall and steel beam[J]. Chinese journal of applied mechanics,2019,36(3):711-718(in Chinese).

[8] XIE M,FOUNDOUKOS N,CHAPMAN J C. Static tests on steel-concrete-steel sandwich beams[J]. Journal of constructional steel research,2007,63(6):735-750.

[9] YAN J B,YAN Y Y,WANG T. Cyclic tests on novel steel-concrete-steel sandwich shear walls with boundary CFST columns[J]. Journal of constructional steel research,2020,164:105760.

[10] LIEW J Y R,SOHEL K M A,KOH C G. Impact tests on steel-concrete-steel sandwich beams with lightweight concrete core[J]. Engineering structures,2009,31(9):2045-2059.

[11] 卢显滨. 双钢板-混凝土组合梁拟静力试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

[12] 严加宝,关慧凝,王涛. 采用增强槽钢连接件的双钢板-混凝土组合梁受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(5):122-129.
YAN Jiabao,GUAN Huining,WANG Tao. Study on flexural behavior of novel steel-concrete-steel sand-wich composite beams with enhanced C-channels[J]. Journal of building structures,2022,43(5):122-129(in Chinese).

[13] 冷予冰,宋晓冰,葛鸿辉,等. 钢板混凝土简支梁抗剪承载模式及承载力分析[J]. 土木工程学报,2015,48(7):1-11.
LENG Yubing,SONG Xiaobing,GE Honghui,et al. Study on shear resisting pattern and strength of simply supported steel-concrete-steel sandwich beams[J]. China civil engineering journal,2015,48(7):1-11(in Chinese).

[14] 覃锋. 核设施钢板组合墙面外抗剪性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔

滨工业大学,2015.

[15] EMORI K. Compressive and shear strength of concrete filled steel box wall[J]. International journal of steel structures,2002,2(1):29-40.

[16] 王金金,范重,邢超,等. 钢板混凝土组合剪力墙轴压比影响研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(7):29-37.
WANG Jinjin,FAN Zhong,XING Chao,et al. Research on effect of axial compression ratio on steel plate concrete composite shear walls[J]. Journal of building structures,2016,37(7):29-37(in Chinese).

[17] 韦芳芳,郑泽军,喻君,等. 基于钢板屈曲分析的双钢板-混凝土组合剪力墙轴压承载力计算方法[J]. 工程力学,2019,36(2):154-164.
WEI Fangfang,ZHENG Zejun,YU Jun,et al. Computational method for axial compression capacity of double steel-concrete composite shear walls with consideration of buckling[J]. Engineering mechanics,2019,36(2):154-164(in Chinese).

[18] 刘阳冰,杨庆年,刘晶波,等. 双钢板-混凝土剪力墙轴心受压性能试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版),2016,48(2):83-90.
LIU Yangbing,YANG Qingnian,LIU Jingbo,et al. Experimental research on axial compressive behavior of shear wall with double steel plates and filled concrete[J]. Journal of Sichuan University(engineering science edition),2016,48(2):83-90(in Chinese).

[19] 夏培秀,邹广平,唐立强. 钢板夹芯混凝土组合梁的界面滑移与变形分析[J]. 工程力学,2013,30(4):254-259.
XIA Peixiu,ZOU Guangping,TANG Liqiang. Analasis of interface slip deformation of steel-concrete-steel composite beam[J]. Engineering mechanics,2013,30(4):254-259(in Chinese).

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构试验方法标准:GB/T 50152—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

(编辑　李坤璐)